

Масленников Г.Е., Микула В.А.  
g26m12@gmail.com

## CFD МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛОЙ КОНВЕКТИВНОГО ГАЗООХЛАДИТЕЛЯ ПГУ-ВЦГ СХЕМЫ SHELL

*Аннотация.* В данной работе выполняется CFD моделирование эрозионного износа входных поверхностей конвективного газоохладителя парогазовой установки с внутрицикловой газификацией угля (ПГУ-ВЦГ) по схеме Shell. Проводятся 3 расчета с различной конфигурацией обтекателя: с плоской перегородкой, конусом, полусферой. Наибольшая глубина износа наблюдается в расчете с плоской перегородкой, оптимальной формой обтекателя является конус, при этом уменьшается максимальная глубина износа.

*Ключевые слова:* ПГУ-ВЦГ; конвективный газоохладитель; эрозия; износ; зола; CFD.

*Abstract.* Numerical modeling of the erosion wear of the input surfaces of a convection gas cooler for the Shell integrated gasification combined cycle (IGCC) process is carried out using the CFD software. There are 3 calculations with different configuration of the bluff body. The greatest erosion depth is observed in the calculation with a flat baffle. The optimum shape of the fairing is a cone, so the maximum wear depth reduce.

*Keywords:* IGCC; convective gas cooler; erosion; wear; ash; CFD.

### Введение

Парогазовая установка с внутрицикловой газификацией угля (ПГУ-ВЦГ или IGCC – Integrated Gasification Combined Cycle) является технологией производства электроэнергии в твердотопливном комбинированном цикле с использованием как газовой, так и паровой турбины. В настоящее время рассматривается как перспективная альтернатива прямому сжиганию твердого топлива, обеспечивающая более высокий КПД (освоенный уровень 43-46%, ожидаемый 50-55%) и более масштабное снижение выбросов CO<sub>2</sub> [1,2]. Основные твердотопливные ПГУ включают в себя Buggenum компании NUON (технология Shell; Нидерланды), Puertollano компании ELCOGAS (Пренфлю; Испания), Nakoso (МНИ; Япония) и Edwardsport компании Duke Energy (GE; США) [3] и др.

Однако по техническим показателям такие установки ещё далеки от совершенства. Основными проблемами, ограничивающих их конкурентоспособность, являются высокие капитальные затраты и низкая эксплуатационная надежность [2]. Система газификации вызывает приблизительно 6% незапланированных отключений. Низкая надежность

системы газификации во многом связана с проблемами накопления шлака, газовой коррозии и эрозионного износа, вызванного потоком золовых частиц [4]. В настоящей работе нами исследуется процесс эрозионного износа поверхности трубок конвективного газоохладителя (ГО). Скорость эрозии зависит от многих факторов: используемых материалов, конструктивных характеристик, режимных параметров. Нами будет рассматриваться эффективность установки обтекателя в уже существующую конструкцию ГО для улучшения распределения потока газа и частиц, что должно снизить риск износа труб в результате эрозии. Плюсами использования обтекателей является то, что они не вносят существенных изменений в конструкцию ГО, а также могут быть легко заменены.

## **1 Проблематика эрозионного износа твёрдыми частицами**

Под эрозионным износом понимают процесс разрушения твёрдых поверхностей потоком абразивных частиц. Эрозию обычно оценивают по массе удаляемого материала в зависимости от массового расхода набегающих частиц, или по скорости роста глубины износа.

То, как разрушается поверхность в результате эрозии твердыми частицами, во многом определяется свойствами материала поверхности, поэтому различают два принципиальных механизма эрозии соответственно для пластичных и хрупких материалов. В 1958 Finnie [5] предложил микрогеометрическую модель эрозии, в которой основным механизмом износа является микро-резание. Когда частица ударяет поверхность под малым углом, она срезает часть материала и создает кратер. Позднее Bellman и Levy (1981) [6] предложили макроскопический механизм эрозии, по которому ударяющие по поверхности частицы выдавливают часть материала на края кратера, образуя тем самым тромбовидные валы. Эти валы легко отделяются от поверхности последующими ударами частиц. В отличие от механизма эрозии пластичных материалов, для хрупких считается, что эрозия является следствием образования трещин [7]. Когда частица попадает на хрупкую поверхность, она создает конусообразные, поперечные и радиальные трещины. Последующие удары вызывают рост этих трещин, в результате чего поверхность дробится на меньшие части, которые затем удаляются. Влияние этих двух процессов трудно спрогнозировать из-за большого числа параметров, влияющих на скорость эрозии: механические свойства частиц и материала мишени; угол падения; скорость удара; и др.

Для расчета эрозионного износа в специфических условиях, определяемых характеристиками частиц, используемыми материалами, режимными

параметрами, разработано более 30 моделей [8]. Поэтому важным этапом в моделировании эрозии является выбор приемлемой расчетной зависимости с учётом поставленных условий. Далее будет кратко описано влияние основных параметров на эрозионный износ. Следует отметить, что все параметры находятся в сложной зависимости друг от друга и определяющим фактором являются свойства материалов частиц и поверхностей, участвующих в процессе износа.

Наиболее часто применяемые на практике выражения для зависимости эрозии и скорости частиц имеют вид  $E \sim U_p^n$ , где  $E$  – скорость эрозии,  $U_p$  – скорость частицы в момент удара, значение степени  $n$  зависит от типа материала и других рабочих характеристик. Часто в расчетах  $n$  принимают равным 3, однако по данным [9,10]  $n$  не является константой и зависит от твердости эродируемого материала. Значение  $n$  для пластичных материалов находится в диапазоне от 2,3 до 2,7; диапазон для хрупких материалов от 2 до 4 [11].

Угол падения определяется как угол между поверхностью преграды и траекторией частицы в момент перед столкновением. Пластичные материалы сильно подвержены эрозии при малых углах падения. Для них максимальная скорость эрозии наблюдается при углах между  $10^\circ$  и  $30^\circ$ , а минимальная – при углах близких к прямому. Для хрупких материалов скорость эрозии возрастает вместе с увеличением угла падения и достигает максимума при прямом угле. Bhushan [12] показал, что максимальная скорость эрозии для хрупких материалов выше, чем для пластичных.

В своей работе [13] Levin В. и др. экспериментально исследовали эрозионную стойкость пластичных сплавов на основе никеля, кобальта и железа. Было показано, что материалы, сочетающие высокую твердость и ударную вязкость при высоких скоростях деформации, имеют хорошую эрозионную стойкость. Твердость необходима для уменьшения энергии, передаваемой частицей материалу, а ударная вязкость отвечает за способность материала поглощать эту энергию без разрушения.

Главными элементами в составе частиц летучей золы обычно являются диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ), окись алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Форма и твердость частицы дополняют друг друга. Даже твердая, но относительно тупая частица не может вызвать серьезную эрозию [14]. Твердые частицы склонны иметь острый профиль; напротив, края мягких частиц скругляются даже при незначительном ударе. Если частицы тверже материала преграды, возникает

сильная эрозия; но если частицы мягче, тогда эрозия происходит только в том случае, если материал мишени имеет низкую прочность (вязкость разрушения).

Механические свойства частиц и преграды, как известно, зависят от температуры. Shida и Fujikawa [15] исследовали влияние температуры на скорость эрозии труб котлов. Они обнаружили, что скорость эрозии увеличивается вместе с ростом температуры и существенно разнится в зависимости от типа стали.

Авторы [16] в своей работе выделяют восемь моделей эрозии твердыми частицами с описанием области их применения. Среди представленных моделей для прогнозирования эрозии конвективного газоохладителя, с нашей точки зрения, наиболее приемлемыми по физическим условиям является модель Табакова-Гранта (Tabakoff-Grand) [17]. Модель разработана для эрозии стальных поверхностей частицами летучей золы; применима к малым, промежуточным и большим углам падения, а также их сочетанию. Характеристики частиц и преграды входят в зависимость в виде эмпирических констант, в качестве переменных рассматриваются скорость и угол падения частиц. Эта модель использовалась для прогнозирования скорости эрозии во многих работах [18,19,20], и результаты показали достаточное согласование между экспериментальными и расчетными данными.

С развитием компьютерных технологий, численные методы моделирования стали мощным инструментом, который позволяет изучать влияние различных параметров на износ, прогнозировать максимальную скорости эрозии и определять области, которые могут быть подвержены эрозии даже в сложных геометриях, в которых проведение эксперимента затруднено.

CFD моделирование эрозии состоит из трех основных этапов: моделирование потока сплошной среды, прогнозирование поведения частиц и использование этих данных для расчета эрозионного износа. Каждый шаг зависит от предыдущего, следовательно, любой нефизический результат на любом из трех этапов влияет на итоговые значения.

## **2 Описание расчетной модели**

Целью нашей работы является численное моделирование эрозионного износа входных поверхностей конвективного ГО, а также анализ способов его минимизации при помощи установки обтекателей различной формы на входе в ГО.

На рис. 1 изображен газификационный блок ПГУ-ВЦГ схемы Shell [21]. Синтез-газ после первой ступени охлаждения при помощи газорециркуляции поступает во вторую конвективную ступень через поворотную камеру. В ней поток газа резко разворачивается вниз и затем распределяется по каналам ГО. Поверхности нагрева ГО выполнены в виде трубных мембранных спиралей. Центральная часть закрыта плоской перегородкой для увеличения скорости газа в каналах ГО и улучшения теплообмена. Поверхности нагрева собраны в четыре охлаждающих блока (ОБ) высотой до 10м.

В программном пакете CFD было выполнено три расчета верхней части конвективного ГО. В первом расчете центральная часть внутренней спирали закрыта плоской перегородкой, во втором и третьем установленный обтекатель имеет форму полусферы и конуса.

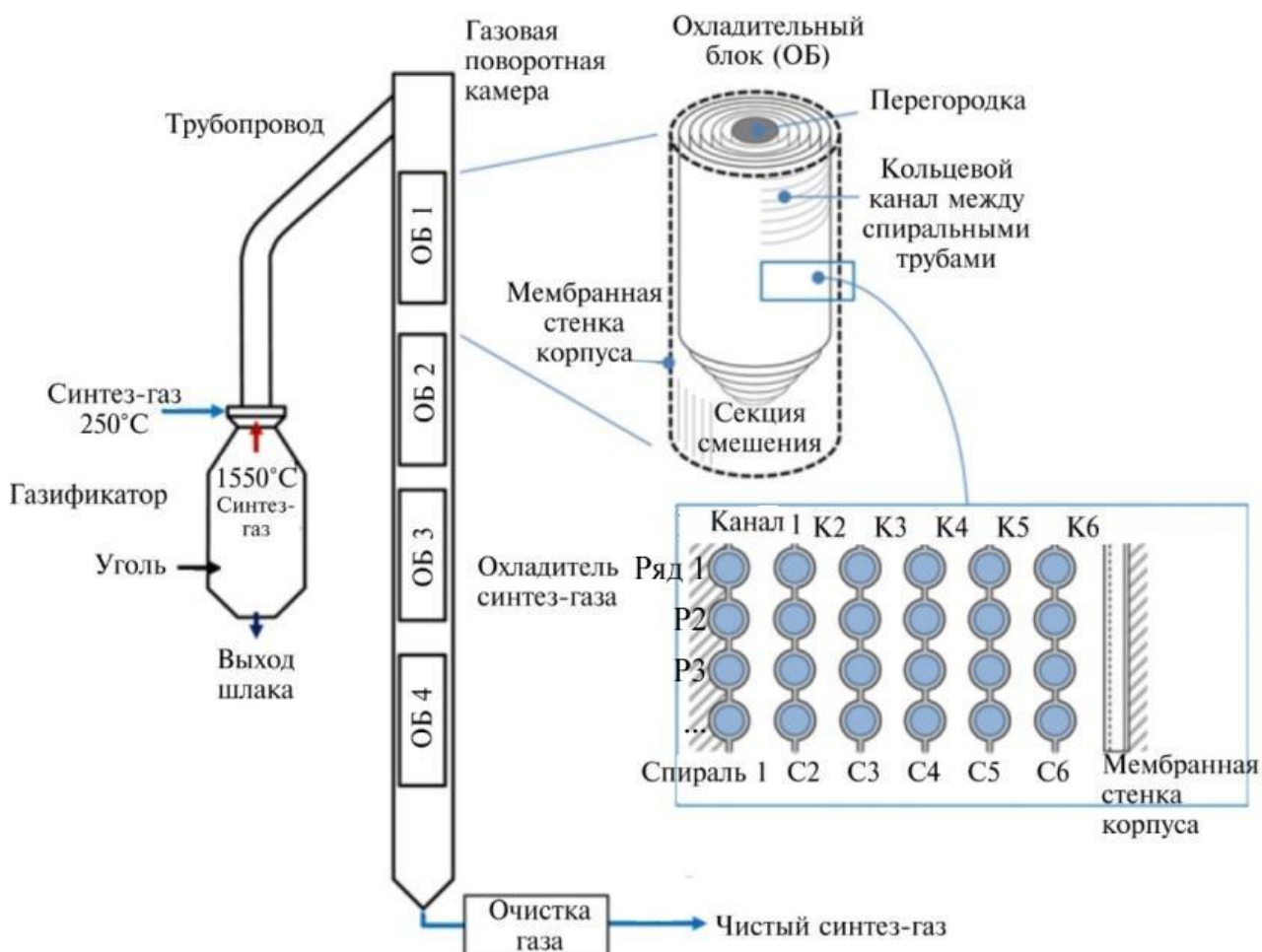


Рисунок 1 – Схема газификационного блока с конвективным газоохладителем и поворотной камерой ПГУ-ВЦГ схемы Shell

## 2.1 Основные уравнения

Для потоков газа с объемной долей частиц менее 0,001, что характерно для потока газа из камеры сгорания, широко применяется подход Эйлера-Лагранжа [20]. Поток жидкости решается как непрерывная фаза путем расчета уравнений переноса, в то время как все частицы, рассматриваемые как дискретная фаза в поле потока, отслеживаются путем решения уравнения движения частиц. В нашем случае предполагается, что поток жидкости является несжимаемым и изотермическим. Для учёта турбулентности принята модель турбулентности realizable k- $\epsilon$  [22].

В этом исследовании частицы считаются сферическими, потому что мелкие частицы летучей золы в целом имеют шарообразную форму [16]. Столкновением между частицами пренебрегаем. Дискретная фаза обменивается импульсом с непрерывной фазой. Траектория частиц в лагранжевой системе отсчета может быть решена путем интегрирования баланса сил на частице. Уравнение движения частицы можно выразить следующим образом [8]:

$$\frac{dU_p}{dt} = F_D(U - U_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F, \quad (1.1)$$

где первый член в правой части представляет силу сопротивления на единицу массы частицы,  $U$  – скорость газовой среды,  $U_p$  – скорость частицы,  $\rho$  – плотность газовой среды,  $\rho_p$  – плотность частицы, а  $F_D$  определяется как

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D \text{Re}_p}{24}, \quad (1.2)$$

где  $d_p$  – диаметр частицы,  $\mu$  – динамическая вязкость газа,  $C_D$  – коэффициент трения.  $\text{Re}_p$  – это относительное число Рейнольдса, которое определяется как

$$\text{Re}_p = \frac{\rho d_p |U_p - U|}{\mu}, \quad (1.3)$$

В уравнении (1.1)  $F$  представляет прочие силы, действующие на частицу. Здесь в соответствии с [20] учитывается только подъемная сила, возникающая за счет сдвига поля течения жидкости (сила Саффмана), которая определяется как

$$F_S = 1,615 \mu d_p^2 \sqrt{\frac{k_r}{\nu}} (U - U_p), \quad (1.4)$$

где  $k_r$  – местный градиент скорости,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости.

Когда частицы ударяются о поверхность, большинство из них отскакивает. Tabakoff и др. [17] провели эксперименты по изучению характеристик отскока

частиц угольной золы, сталкивающихся с поверхностью из нержавеющей стали, и предложили выражения нормальных и тангенциальных коэффициентов восстановления на основе экспериментальных результатов. В настоящей работе коэффициенты восстановления выражаются следующими уравнениями [17]:

$$\frac{U_{n2}}{U_{n1}} = 1,0 - 0,4159\beta - 0,4994\beta^2 + 0,292\beta^3, \quad (1.5)$$

$$\frac{U_{t2}}{U_{t1}} = 1,0 - 2,12\beta + 3,0775\beta^2 - 1,1\beta^3, \quad (1.6)$$

где  $U$  представляет скорость удара частицы. Индексы  $n$  и  $t$  представляют собой нормальное и тангенциальное направление соответственно. Индексы 1 и 2 представляют условия до и после столкновения соответственно.  $\beta$  – угол столкновения между скоростью падения и касательной к поверхности.

## 2.2 Модель эрозии

Как было сказано выше, наиболее приемлемыми по физическим условиям в нашем случае является модель Табакова-Гранта [17]:

$$E = \left\{ 1 + C_K K_{12} \sin\left(\frac{90}{\beta_0}\beta\right) \right\}^2 \left( \frac{U_p}{U_1} \right)^2 \cos^2\beta \left[ 1 - \left( 1 - \frac{U_p}{U_2} \sin\beta \right)^2 \right] + \left( \frac{U_p}{U_3} \sin\beta \right)^4, \quad (1.7)$$

где  $E$  – скорость эрозии, определяется как отношение потери массы преграды к массе ударяющих частиц, мг/г;  $U_p$  – скорость соударения, м/с;  $\beta$  – угол падения частиц в градусах;  $\beta_0$  – угол падения частиц, при котором достигается максимальная скорость эрозии;  $C_K$  – коэффициент восстановления при ударе в тангенциальном направлении,  $C_K = 0$  при  $\beta \leq 3\beta_0$  и  $C_K = 1$  при  $\beta > 3\beta_0$ ;  $K_{12}$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  – эмпирические константы.

Трубы ГО изготовлены из никелевого сплава Инконель, как показано в работе [13], его эрозионная стойкость на 10-12% выше чем у нержавеющей стали, поэтому для консервативных результатов в нашем случае выбраны оригинальные эмпирические константы в соответствии с [17] для стальной поверхности, подверженной воздействию частиц, они равны:  $K_{12} = 0,296$ ;  $U_1 = 1,620 \cdot 10^{-5}$  м/с;  $U_2 = 5,249 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $U_3 = 5,793 \cdot 10^{-10}$  м/с;  $\beta_0 = 25^\circ$ .

## 2.3 Граничные условия

Расчетная область, смоделирована в виде сектора. Входное сечение расчетной области расположено на высоте 1 м от верхней кромки теплообменных поверхностей, данный размер выбран из условия дельнейшего размещения

обтекателя. Наружный диаметр труб  $d = 44$  мм; относительный шаг между витками спирали  $s_2/d = 2$ ; расстояние от оси труб внешней спирали до корпуса  $0,5s_2$ . Поскольку данная работа не сосредоточена на исследовании характеристик газа в каналах ГО, для упрощения расчета спирали смоделированы в виде цилиндрических поверхностей, кроме двух верхних витков со сферической верхней кромкой. В первом базовом расчете центральная часть внутренней спирали закрыта плоской перегородкой, во втором и третьем установленный обтекатель имеет форму полусферы и конуса.

В таблице 1 представлены основные начальные параметры синтез-газа при номинальной нагрузке, полученные из расчета поворотной камеры [21]. Диаметр частиц варьируется от 2 до 100 мкм, плотность одинакова для всех и составляет 2800 кг/м<sup>3</sup>. Предполагается, что частицы, поступающие в вычислительную область, имеют равномерное распределение по входному сечению.

Таблица 1 – Начальные параметры

	Параметры	Величина
Синтез газ	массовый расход, кг/с	113,1
	температура, °C	750
	давление (абс.), бар	42
	CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> (% об.)	59,2; 5,1; 28,5; 7,2
Шлак	массовый расход, кг/с	1,83
	плотность, кг/м <sup>3</sup>	2800
	количество частиц	44632

### 3 Результаты и обсуждение

С инженерной точки зрения наиболее важным параметром, отражающим опасность эрозионного износа твердыми частицами, является максимальная глубина эрозии, которая в расчете отражается максимальной скоростью эрозии в мм/год.

Базовым является вариант с плоской перегородкой, по нему проводилась верификация расчетной модели. Максимальная скорость эрозионного износа составила 0,59 мм/год на втором витке второй спирали или ГО<sub>2-2</sub> (далее первый индекс будет обозначать номер спирали, начиная от центра, второй индекс – номер витка на этой спирали, начиная сверху). Менее всего износу подвержена первая спираль ГО, здесь скорости газа и частиц минимальны. Плавники, соединяющие витки между собой также практически не подвергаются износу. Во входном сечении газ имеет скорость 3,75 м/с, в литературе отмечается, что максимальная скорость



эрозии круглых труб котлов при такой скорости потока находится в диапазоне 0,4-0,6 мм/год в области 40-50° от критической точки по профилю трубы [14,23]. Это согласуется с полученными нами данными.

Из-за закрытой центральной части вертикальный поток газа с частицами отклоняется так, что он попадает в каналы ГО под углом. Это приводит к тому, что скорости эрозии на вторых витках оказываются выше, чем на первых. Такое распределение зон износа характерно для шахматных пучков [24].

Далее будет рассмотрено влияние формы обтекателя на характер эрозионного износа. Кроме плоской перегородки, рассматриваются обтекатели в виде конуса и полусферы.

В случае с плоской перегородкой синтез газ распределяется по каналам ГО неравномерно, средняя скорость в первом канале составила 7,9 м/с и 8,7 м/с в шестом. Установка обтекателя улучшает распределение потока по каналам: средняя скорость газа в первом канале увеличивается до 8,2 м/с с конусом и до 8,3 м/с со сферой, в шестом канале скорость снижается до 8,6 м/с в обоих случаях. Это сказывается на характере износа.

На рис. 2 представлено сравнение полученных максимумов скоростей износа с разными обтекателями. Из всех вариантов наибольшие пиковые значения эрозии получены в расчете с плоской крышкой, это говорит о целесообразности установки обтекателя для уменьшения опасности эрозионного износа теплообменных поверхностей. Обтекатели уменьшают максимумы на второй спирали как на первом витке, так и на втором, однако на остальных спиралях эрозия усиливается. Картина износа заметно «выравнивается» на первом ряду витков, здесь пик смещается со второй спирали на шестую. На втором ряду тенденция сохраняется. Наиболее интенсивному износу по-прежнему подвержен ГО<sub>2-2</sub>: 0,50 мм/год с конусом и 0,47 мм/год с полусферой. По сравнению с полусферой конус показывает лучшие результаты, поэтому такую форму можно считать наиболее оптимальной.

На рис. 3 показаны траектории частиц, цвет отражает их скорость. В первом канале поток частиц заметно сильнее смещается в сторону. Можно видеть, что на ГО<sub>2-2</sub> попадает значительная доля частиц, это и приводит к самому интенсивному истиранию в этой области.

Поведение частиц в первом канале свидетельствует о неполном выравнивании потока газа, поэтому после обтекателя требуется зона, в которой поток успеет перераспределиться. Для этого в дальнейших расчетах нами планируется увеличить высоту установки обтекателя и провести оптимизацию этого параметра.

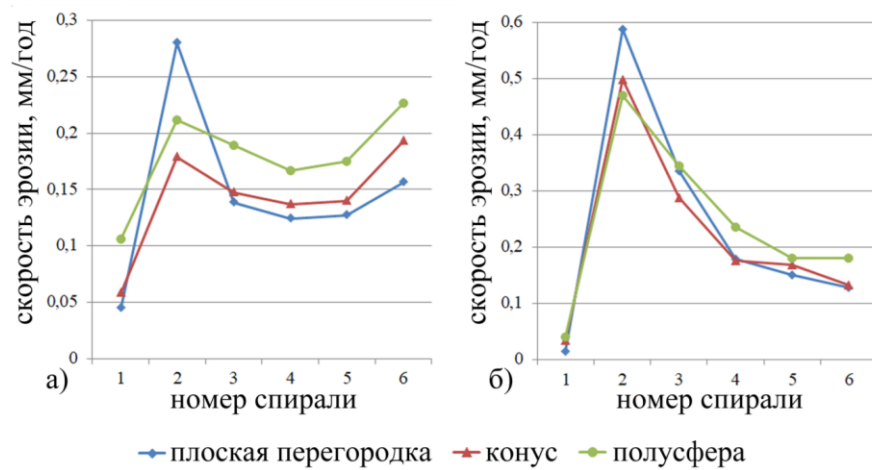


Рисунок 2 – Максимальные скорости эрозии:  
а – на первом ряду; б – на втором ряду

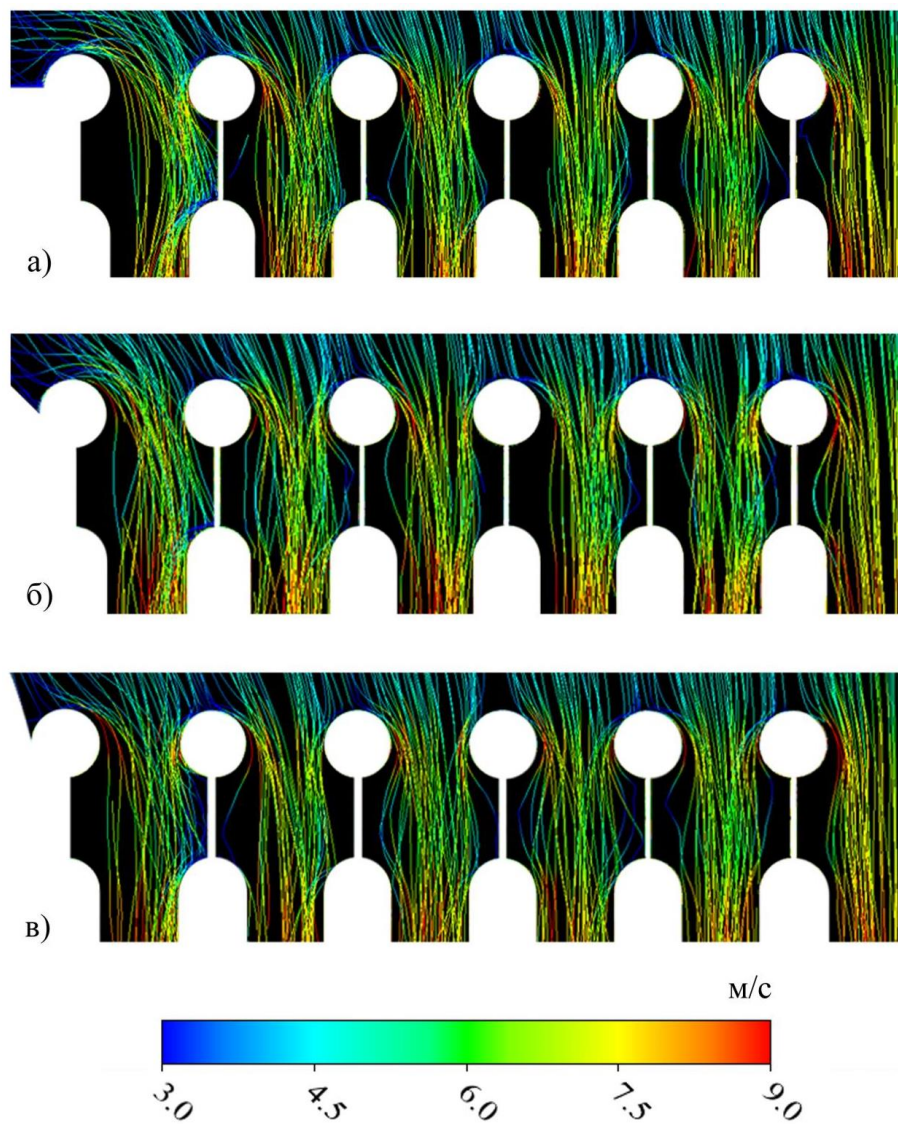


Рисунок 3 – Траектории частиц:  
а – плоская перегородка; б – конус; в – полусфера

## **Заключение**

В статье было выполнено численное моделирование эрозионного износа золой конвективного газоохладителя ПГУ-ВЦГ схемы Shell. Рассматривалось влияние формы обтекателя на характер износа. Были получены следующие результаты:

- Наибольшие пиковые значения эрозии получены в расчете с плоской перегородкой, это говорит о целесообразности установки обтекателя для уменьшения опасности эрозионного износа.
- Интенсивному износу подвержен второй виток второй спирали, здесь скорости эрозии достигают 0,59 мм/год с плоской крышкой, 0,50 мм/год с конусом и 0,47 с полусферой.
- По сравнению с полусферой конус показывает лучшие результаты, поэтому такую форму можно считать наиболее оптимальной.
- Установка обтекателя улучшает распределение потока газа по каналам ГО, однако требуется зона, в которой поток успеет перераспределиться перед входом в каналы ГО. Для этого в мы планируем увеличить высоту установки обтекателя и провести оптимизацию этого параметра.

## ***Библиографический список***

1. Анализ технологических решений для ПГУ с внутрицикловой газификацией угля : монография / Н. А. Абаймов, И. Б. Амарская, В. С. Белоусов [и др.] ; под ред. А. Ф. Рыжкова. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 564 с.
2. Fen H. Improvement opportunities for IGCC / H. Fen, R. Berg // Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Technologies. – [S. l.] : Woodhead Publishing : Elsevier, 2017. – P. 833–846.
3. Wolfersdorf C. The current status and future prospects for IGCC systems / C. Wolfersdorf, B. Meyer // Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Technologies. – [S. l.] : Woodhead Publishing, 2017. – P. 847–889.
4. Wang P. Slag Behavior in Gasifiers. Part 1. Influence of Coal Properties and Gasification Conditions / P. Wang, M. Massoudi // Energies. – 2013. – Vol. 6. – P.784–806.
5. Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles / I. Finnie // Wear. – 1960. – Vol. 3, Is. 2. – P. 87–103.
6. Bellman R. Erosion mechanism in ductile metals / R. Bellman, A. Levy // Wear. – 1981. – Vol. 70. – P. 3–28.
7. Srinivasan S. Effect of erodent hardness on erosion of brittle materials / S. Srinivasan, R. O. Scattergood // Wear. – 1988. – Vol. 128, Is. 2. – P. 139–152.

8. A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications / M. Parsi, K. Najmi, F. Najafifard [et al.] // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2014. – Vol. 21. – P. 850–873.
9. Oka Y. I. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 1 : Effects of impact parameters on a predictive equation / Y. I. Oka, K. Okamura, T. Yoshida // *Wear*. – 2005. – Vol. 259. – P. 95–101.
10. Oka Y. I. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 2. Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage / Y. I. Oka, T. Yoshida // *Wear*. – 2005. – Vol. 259. – P. 102–109.
11. Humphrey J. Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact / J. Humphrey // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 1990. – Vol. 11. – P. 170–195.
12. Bhushan B. *Introduction to Tribology* / B. Bhushan. – 2-e ed. – New York : Wiley, 2013. – 744 c.
13. Modeling solid-particle erosion of ductile alloys / B. F. Levin, K. S. Vecchio, J. N. DuPont, A. R. Marder // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 1999. – Vol. 30, Is. 7. – P. 1763–1774.
14. Lee B. E. Computational study of solid particle erosion for a single tube in cross flow / B. E. Lee, C. A.J. Fletcher, M. Behnia // *Wear*. – 2000. – Vol. 240. – P. 95–99.
15. Shida Y. Particle erosion behaviour of boiler tube materials at elevated temperature / Y. Shida, H. Fujikawa // *Wear*. – 1985. – Vol. 103. – P. 281–296.
16. Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchangers for middle/low temperature waste heat utilization: A review on simulation and experiment / M. J. Li, S. Z. Tang, F. Wang [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – Vol. 126. – P. 737–761.
17. Tabakoff W. Erosion study of different materials affected by coal ash particles / W. Tabakoff, R. Kotwal, A. Hamed // *Wear*. – 1979. – Vol. 52. – P. 161–173.
18. Experimental and numerical investigation of particle erosion caused by pulverised fuel in channels and pipework of coal-fired power plant / K. P. Schade, H. J. Erdmann, T. Hädrich [et al.] // *Powder Technology*. – 2002. – Vol. 125. – P. 242–250.
19. Niu Y. Y. Numerical evaluation of erosion in curved ducts / Y. Y. Niu, J. C. Tsao // *Numerical Heat Transfer Part A: Applications*. – 2002. – Vol. 41, Is. 4. – P. 341–356.
20. Numerical study of the solid particle erosion on H-type finned circular/elliptic tube surface / Yu Jin, Gui-Hua Tang, Ya-Ling He, Wen-Quan Tao // *Communications in Computational Physics*. – 2017. – Vol. 21, Is. 2. – P. 466–489/
21. Gas and particle flow characteristics in the gas reversing chamber of a syngas cooler for a 300 MWe IGCC process/ P. Sangbin, I. S. Ye, J. Oh [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – Vol. 70. – P. 388–396.

22. A new  $k$ - $\varepsilon$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows / T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir [et al.] // Computers & Fluids. – 1995 – Vol. 24, Is. 3. – P. 227–238.
23. Жангаскин К. К. Численный анализ эрозионного износа при поперечном обтекании цилиндра газоабразивным потоком / К. К. Жангаскин, Г. Н. Когай // Теплоэнергетика. – 1999. – № 4. – С. 57–59.
24. Жихар Г. И. Котельные установки тепловых электростанций : учеб. пособие / Г. И. Жихар – Минск : Высшая школа, 2015. – 523 с.